



开鲁盆地陆东凹陷九佛堂组沉积相及有利砂体分布

陈怀毅, 张云峰

东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163000

摘要: 为研究开鲁盆地陆东凹陷交力格地区九佛堂组层序格架下沉积特征和有利砂体的分布, 采用灰色关联分析法求取综合评价因子 RQI 对有利储集相带进行预测, 明确了九佛堂组沉积演化过程中不同沉积体系的动态变化及沉积相展布。通过层序界面、体系域界面识别将地层划分为低位域、湖浸域、高位域。在体系域内近岸堆积—半深湖和扇三角洲—滨浅湖两套沉积体系交替发育。低位域末期—湖浸域时期扇三角洲主要发育前缘相带。通过岩相特征、地震相特征、单井精细刻画等手段共识别 8 种不同沉积微相。对沉积相展布特征进行了详细刻画, 并将储层划分为 3 类, 其中扇三角洲前缘内牵引流成因砂体形成的储层最好, 近岸堆积及前缘根部泥石流、洪流成因砂体形成的储层最差。此结果可为研究区进一步勘探开发提供依据。

关键词: 九佛堂组; 沉积相; 有利砂体; 灰色关联分析法; 陆东凹陷; 交力格洼陷; 开鲁盆地

SEDIMENTARY FACIES AND FAVORABLE SAND BODY DISTRIBUTION OF JIUFOTANG FORMATION IN LUDONG DEPRESSION, KAILU BASIN

CHEN Huai-yi, ZHANG Yun-feng

College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163000, Heilongjiang Province, China

Abstract: To study the sedimentary characteristics and distribution of favorable sand bodies in the sequence stratigraphic framework of Jiufotang Formation in Jiaolige area of Ludong depression, Kailu Basin, the paper adopts grey correlation analysis method to calculate the comprehensive evaluation factor of reservoir quality index (RQI) and predict the favorable reservoir facies belt, and defines the dynamic changes of different sedimentary systems and sedimentary facies distribution during the sedimentary evolution process of Jiufotang Formation. The strata can be divided into lowstand system tract, lake-flooding system domain and highstand system tract through the identification of sequence interface and system tract interface. Two sedimentary systems of nearshore accumulation-semi deep lake and fan delta-shore shallow lake are alternately developed in the system tract. The front facies belt is mainly developed in the fan delta during the late lowstand system tract and lake-flooding system domain periods. Eight sedimentary microfacies are identified based on the lithofacies, seismic facies characteristics and fine characterization of single well. Through the detailed characterization of sedimentary facies distribution characteristics, the reservoirs are divided into three categories, among which the reservoir formed by traction flow depositional sand bodies in fan delta front is the

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2022-12-13. 编辑: 李兰英.

基金项目: 国家自然科学基金项目“源下型陆相致密油富集机理及地质-工程甜点评价技术研究”(42172150).

作者简介: 陈怀毅 (1998—), 男, 硕士, 从事沉积地质及储层地质研究, 通信地址 黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号, E-mail//1146702435@qq.com

通信作者: 张云峰 (1968—), 男, 博士, 教授, 从事沉积学和石油地质学研究, 通信地址 黑龙江省大庆市高新技术开发区学府街 99 号, E-mail//94073505@qq.com

best, while those formed by nearshore accumulation, debris flow and torrent originated sand bodies in the front root are the worst. The results may provide a basis for further exploration and development of the study area.

Key words: Jiufotang Formation; sedimentary facies; favorable sand body; grey correlation analysis; Ludong depression; Jiaolige sag; Kailu Basin

0 引言

开鲁盆地陆东凹陷交力格地区具有陆相断陷盆地特征,沉积体系类型多样.李瑛^[1]认为交力格地区发育东部斜坡带近岸水下扇、马北斜坡带辫状河三角洲沉积体系;苍正毅^[2]认为陆东凹陷发育辫状河三角洲、扇三角洲、浊积扇等沉积体系;刘明洁等^[3]应用层序地层学原理在层序格架内认为九佛堂组发育扇三角洲、浊积扇、湖泊相等沉积相态;裴家学^[4]对九佛堂上段进行综合研究认为主要发育湖泊、近岸水下扇、扇三角洲等沉积相类型.综合前人研究成果分析,目前还存在沉积体系杂乱不统一、九佛堂组沉积演化不清晰、有利储层相带缺乏研究等问题.本文应用层序地层学和地震沉积学原理在九佛堂组三级层序及体系域界面基础上划分8个四级层序地层单元(Sq2-1—Sq2-8),通过沉积相标志(岩相、地震相特征等)、沉积相类型判断、单井相—测井相分析、地震属性切片提取等因素综合分析沉积相展布特征,识别沉积体系以及垂向上不同沉积体系下的砂体展布形态,继而利用灰色关联分析法对储集砂体进行分类评价,预测有利储层分布相带,以为交力格地区勘探开发工作提供科学依据.

1 区域地质背景

陆东凹陷位于内蒙古自治区东部,分为东部三十方地洼陷、中央构造带以及西部交力格洼陷3个单元(图1)^[5-6].交力格地区主要受东西向边界断层及一系列北东向断层控制,整体表现为北高南低、西低东高的构造特点^[2].洼陷南部受断层控制,地层发育较厚,南北向和北北东向断层对局部构造起控制作用^[7-8].区内发育白垩系下统义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组等地层,其中九佛堂组为该区主要产油层段^[4].在根据四级层序界面以及体系域界面对九佛堂组地层划分研究的基础上,将九佛堂组分为低位域(LST)、湖侵域(TST)、高位域(HST)体系,并依据沉积旋回特征,进一步划分出8个五级层序(与8套砂组相对应):九上

I—III段砂组(Sq2-8—Sq2-6)主要发育大套灰褐色油页岩,九上IV—V砂组(Sq2-5—Sq2-4)主要发育深灰色泥岩互层夹薄层砂岩,九下I—III砂组(Sq2-3—Sq2-1)主要发育大套灰色凝灰质砂岩、泥岩与细粉砂岩互层^[4].

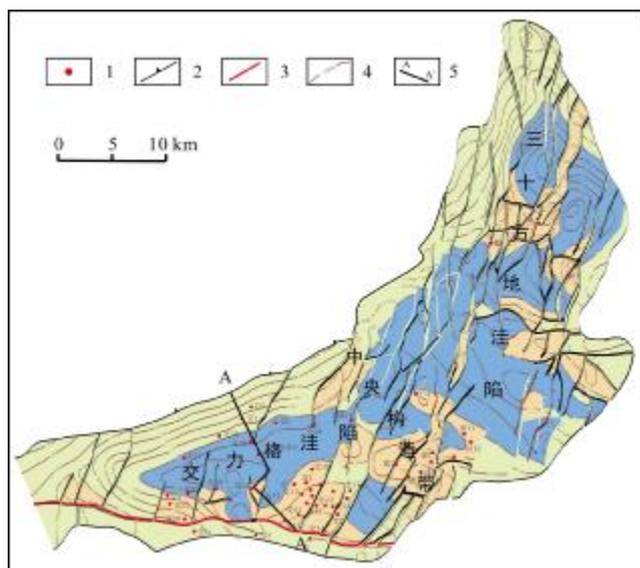


图1 陆东凹陷构造单元分区图

Fig. 1 Tectonic division map of Ludong depression

1—井点(well); 2—剥蚀线(denudation line); 3—断层(fault); 4—构造等深线(structure depth contour); 5—地震剖面位置(seismic section)

2 沉积相特征

2.1 相标志分析

2.1.1 岩相特征

通过岩心观察与对比,沉积过程动力成因主要由牵引流、砂质碎屑流、滑动滑塌作用、高/低密度浊流、羽流/原地沉降五大类组成.进一步依据岩石类型、沉积结构特征,识别出9种砾岩岩相、15种砂岩岩相、3种泥岩岩相以及11种岩相组合(表1,图2).砾岩岩相多见杂基—颗粒支撑块状中砾岩、杂基支撑叠瓦状细砾岩等,反映砾质碎屑流、牵引流动力成因;砂岩、泥岩岩相多见叠瓦状、平行和交错层理砂岩、正递变粉细砂

表 1 岩相分类表
Table 1 Classification of lithofacies

岩类	岩相	代号	沉积特征	成因解释
砾岩	杂基-颗粒支撑块状中砾岩	G1	块状构造,砾石杂乱分布可见粗砾级砾石	砾质碎屑流
	杂基支撑叠瓦状中砾岩	G2	无明显层理,砾石呈叠瓦状,部分具反递变特征	牵引流
	杂基-颗粒支撑交错层理中细砾岩	G3	大型交错层理,砾石呈叠瓦状	牵引流
	颗粒支撑块状中细砾岩	G4	块状构造,砾石杂乱分布	砾质碎屑流
	杂基支撑块状中细砾岩	G5	块状构造,砾石杂乱分布	砾质碎屑流
	杂基支撑反递变中细砾岩	G6	反递变层理,砾石杂乱分布	高密度浊流
	杂基支撑正递变中细砾岩	G7	正递变层理,砾石呈杂乱状	高密度浊流
	平行层理细砾岩	G8	发育平行层理,砾石定向排列	牵引流
	叠瓦状细砾岩	G9	细砾岩,内部砾石沿层面呈叠瓦状排列	牵引流
含砾砂岩	块状含砾砂岩	B1	块状构造,砾石杂乱分布	砂质碎屑流
	正递变含砾砂岩	B2	正递变层理	牵引流浊流
	叠瓦状含砾砂岩	B3	砂岩内部砾石沿层面呈叠瓦状排列	牵引流
砂岩	块状粗砂岩	S1	块状构造	砂质碎屑流
	平行层理中砂岩	S2	平行层理,见泥质纹层	牵引流
	交错层理细砂岩	S3	交错层理,见泥质纹层	牵引流
	块状细砂岩	S4	块状构造,分选较好	砂质碎屑流
	含透镜状漂砾块状细砂岩(泥质)	S5	整体块状构造,含漂砾块,泥质丰富	泥质碎屑流
	泄水构造粉细砂岩	S6	泄水构造、震积构造	滑塌
	变形层理粉细砂岩	S7	包卷层理、揉皱层理	滑塌
	交错层理粉细砂岩	S8	交错层理,可见反韵律	滑动
	波纹交错层理粉细砂岩	S9	小型交错层理,夹泥质纹层	浊流
	块状粉砂岩	S10	块状层理	砂质碎屑流
	正递变粉细砂岩	S11	正递变层理	浊流
	泥质条带粉砂岩	S12	泥质条带呈包卷层理冲进砂层	浊流
粉砂泥岩	断续水平层理暗色粉砂质泥岩	M1	水平层理,富植物碎片	浊流/原地沉降
	块状暗色粉砂质泥岩	M2	块状构造,富植物碎片	羽流/原地沉降
	含漂砾粉砂质泥岩	M3	暗色泥岩夹断续毫米级薄砂层,富植物碎片	羽流/原地沉降

岩、断续水平层理,反映牵引流、砂质碎屑流、低密度浊流/原地沉降多种动力成因。岩相组合主要反映近岸快速堆积、长源搬运沉积、远源浊流沉积 3 种类别^[9-11]。

2.1.2 地震相特征

外前缘连续反射地震相表现为一组振幅强、连续性较好的同相轴,反映了一个相对稳定、水动力条件较

弱的沉积环境,代表在均匀沉降的盆地缓坡部位上的匀速沉积作用;湖相席状地震相分布范围较小,一般代表深湖—半深湖、滨浅湖沉积,也有可能是扇三角洲前缘或前扇三角洲亚相的地震响应,振幅相对较强,连续性较好;内前缘反射地震相为中强振幅,连续性相对差,沉积环境相对不稳定,水动力条件增强,一般代表扇三

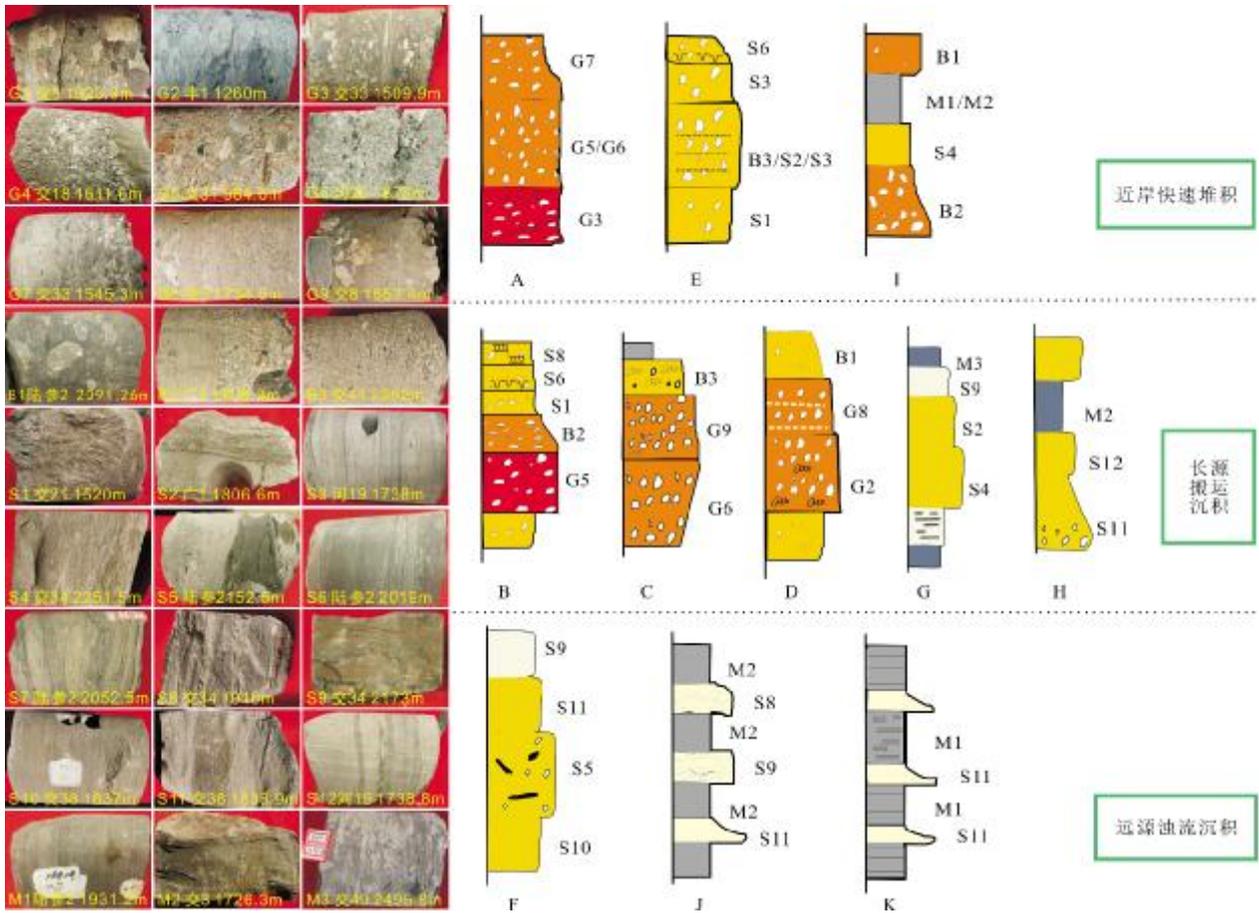


图 2 交力格地区岩相特征及岩性组合图

Fig. 2 Lithofacies characteristics and lithological assemblage of Jiaolige area

G1—G9: 砾岩岩相(conglomerate lithofacies); B1—B3: 含砾砂岩岩相(pebbly sandstone lithofacies); S1—S12: 砂岩岩相(sandstone lithofacies); M1—M3: 泥岩岩相(mudstone lithofacies); A—K: 岩相组合(lithofacies assemblage)

角洲内前缘地区; 充填杂乱反射地震相振幅强度变化大,是断续、不规则的反射,水体能量强,一般靠近物源、推移距离较短,堆积速度较快,主要分布在交力格洼陷南部地区,代表近岸水下扇沉积环境^[4, 12-13](图 3).

2.1.3 单井-测井相特征

(1) 陆参 2 井岩相-测井相精细刻画沉积微相

陆参 2 井位于陆东凹陷中北部沉积中心. 九上 I—III 砂组主要发育大套的深湖沉积油页岩, 自然电位(SP)曲线较为平直,含油地层电阻率(RT)、浅电阻率(RS)微起伏,为质量较好的优质烃源岩;九上 IV—V 砂组发育大套砂岩, 粒度概率曲线为分选较好的跃移-悬浮两段式,自然电位钟形、自然伽马(GR)锯齿形,RT、RS 齿状低阻,判断为扇三角洲相;九下段沉积大套凝灰质砂岩与泥岩互层, 上部为厚层凝灰质细砂岩,在 GR 曲线上呈复合箱形,沉积微相以扇三角洲前

缘碎屑流河道为主,局部为浊积薄层砂,下部 GR、SP 曲线锯齿形且幅度变化较小,整体为较弱的水动力环境,为深湖—半深湖的泥岩沉积. 该井 1 930~1 936 m 层段主要为块状细砂岩、正递变细砂岩相,垂向正韵律块状细—粉砂岩 G 型(图 2)沉积组合. 测井相整体呈高幅箱型, 粒度概率累积曲线两段式,跃移组分斜率高,指示砂质碎屑流或河口端冻结式快速堆积特征,判断为扇三角洲外前缘环境. 该层段主要为扇三角洲外前缘砂质碎屑流水道及水道间、席状砂相带.

(2) 交 8 井岩相-测井相精细刻画沉积微相

交 8 井位于凹陷南部. 九上段主要为杂基支撑的砂砾岩,自然电位曲线变化幅度不大,自然伽马、含油地层电阻率、浅电阻率主要为锯齿形和箱形,水体能量强,近物源,重力流特征明显. 交 8 井上部划分为近岸水下扇中相,下部划分为近岸水下扇扇根亚相,其

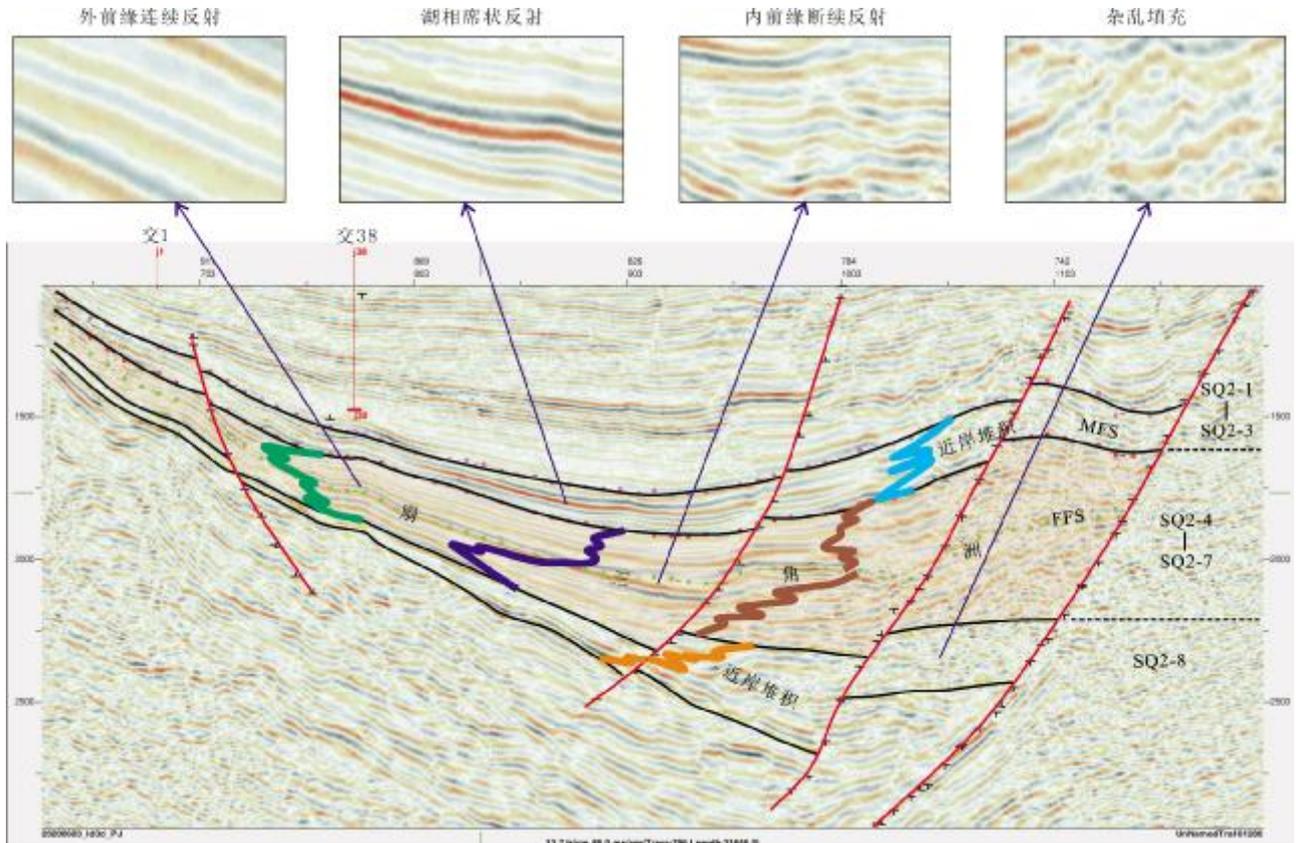


图3 陆东凹陷交力格地区地震相特征

Fig. 3 Seismic facies characteristics of Jialige area, Ludong depression

1 928~1 930 m 层段主要为杂基支撑块状砾岩-砂砾岩相,岩相垂向组合为 A 型正韵律砾岩-砂砾岩(图 2)。测井相呈齿化箱型,粒度概率累积曲线为低斜两段式,重力流及牵引流成因河道砂体沉积特征明显,判断为近岸快速沉积环境,主要为近岸水下扇扇根。

2.2 沉积相类型与展布特征

根据取心资料、测井资料,结合地震相、岩心相分析结果,研究认为九佛堂组主要发育扇三角洲相和近岸水下扇相。通过沉积相标志以及单井沉积微相精细刻画,主要识别出水下牵引流河道、水下碎屑流水道、重力流主沟道、重力流辫状沟道、滑动滑塌体、席状朵叶体(席状砂)、滨浅湖细粒沉积、深湖—半深湖油页岩 8 种微相。在 X 射线全岩衍射以及重矿物相对含量分析的基础上,判断洼槽区主要为南部和北部两大物源。同时,从古地貌出发对交力格地区砂地比进行研究,砂体厚度中心与古地貌沉降中心一致性较高,可以验证南部陡坡带及北部三角洲两大物源^[14]。

2.2.1 沉积相垂向展布特征

本研究选择顺物源方向及切物源方向两条剖面进行研究。顺物源方向剖面位于研究区中部,通过图 4a 分析得出,九佛堂组南部地层较厚,砂体主要来自南部物源,北部为推进范围较小的扇三角洲外前缘砂体。九佛堂组主要发育扇三角洲—滨浅湖和近岸水下扇—半深湖沉积体系,顺物源方向,沉积体系三分明显,南北物源差异清晰。九下 III 砂组近岸水下扇发育大套砂砾岩;九下 II 至九上 IV 砂组扇三角洲发育面积较大,外前缘亚相前推较广,为九佛堂组主力含油储层;九上 III 至九上 I 砂组发育近岸水下扇,中部洼陷带发育少量的浊积薄层砂。切物源方向剖面位于研究区南部,贯穿交南断阶带。通过图 4b 分析得出,砂体集中在九佛堂组中间段,发育少量的浊积薄层砂,横向上不同发育期次的近岸水下扇相与扇三角洲相砂体相互切叠,呈现时间与空间上双重叠置的二元沉积模式。通过垂向剖面分析,九佛堂组时期主要发育两大沉积体系:九下 III 砂组发育近岸堆积—半深湖体系,九下 II 砂组至九

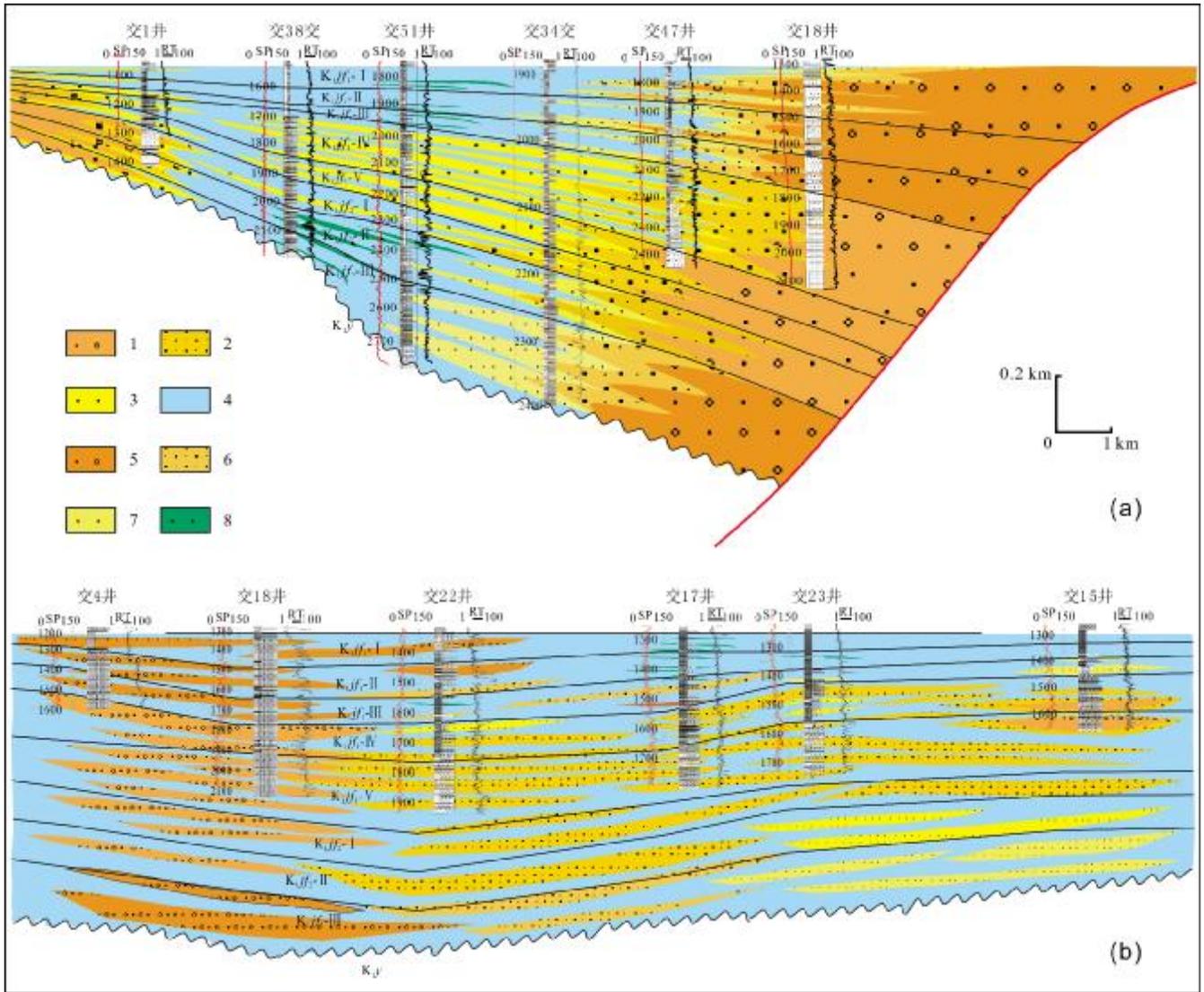


图 4 陆东凹陷交力格地区九佛堂组连井沉积剖面图

Fig. 4 Cross-well sedimentary profiles of Jiufotang Formation in Jiaolige area, Ludong depression

a—顺物源方向剖面 (along the source direction); b—切物源方向剖面 (cross-cutting the source direction); 1—扇三角洲前缘根部砂体 (fan delta front root sand body); 2—扇三角洲内前缘砂体 (fan delta internal front sand body); 3—扇三角洲外前缘砂体 (fan delta external front sand body); 4—半深湖-深湖相(semi deep-deep lacustrine facies); 5—近岸水下扇扇根(root of nearshore subaqueous fan); 6—近岸水下扇扇中(middle of nearshore subaqueous fan); 7—近岸水下扇扇端(end of nearshore subaqueous fan); 8—浊积薄层砂(turbidite thin sandstone)

上IV砂组时期发育扇三角洲—滨浅湖沉积体系，九上III—I砂组发育近岸堆积—半深湖沉积体系。

2.2.2 沉积相平面展布特征

利用均方根振幅地层切片勾勒砂体外部发育轮廓，瞬时频率地层切片刻画不同发育时期砂体内部碎屑水道与主水道，控制砂体内部展布形态，综合沉积模式与形态特征对九佛堂组平面相图(图 5)进行精细绘制。研究表明：交力格洼槽砂体主要为南部物

源，九佛堂组主要发育扇三角洲前缘亚相与近岸水下扇沉积，九上段油层段(图 5a)发育扇三角洲前缘亚相，近岸水下扇前推较近；前缘相带根部存在平原/前缘过渡带，总体看来凹陷北部扇三角洲规模较小，而南部扇三角洲和近岸水下扇规模相对较大^[15-16]；九下段主要发育近岸水下扇及扇三角洲前缘（包括内前缘与外前缘）(图 5b)，南部扇体面积较大，为厚层块状砂砾岩体沉积特征，扇体向洼陷内延伸，岩性变细变薄，逐

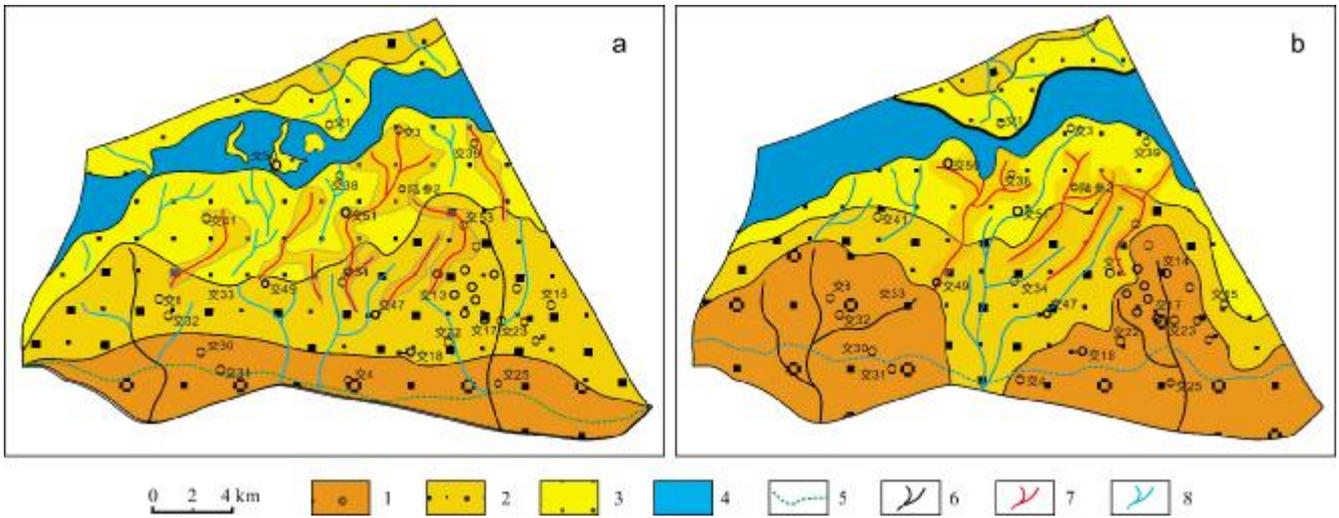


图5 陆东凹陷交力格地区九佛堂组沉积平面相图

Fig. 5 Sedimentary facies map of Jiufotang Formation in Jiaolige area, Ludong depression

a—九佛堂组上段油层组(upper member of Jiufotang fm.); b—九佛堂组下段沉积相图(lower member of Jiufotang fm.); 1—近岸堆积/扇三角洲前缘根部(nearshore accumulation/fan delta front root); 2—扇三角洲内前缘(fan delta internal front); 3—扇三角洲外前缘(fan delta external front); 4—滨浅湖(shore-shallow lake); 5—扇三角洲平原/前缘过渡带(fan delta plain/front transition); 6—重力流主沟道(gravity flow main channel); 7—碎屑流水道(debris flow water channel); 8—牵引流水道(traction flow water passage)

渐过渡为滨浅湖相沉积的特点。

3 沉积-储层耦合关系研究

本文利用灰色关联分析法,采取多因素综合分析评价储层,预测有利储层分布相带。该方法数据量小,操作简单,可减少因单一因素产生的研究影响,使分析结果更加客观准确。具体通过求取综合评价因子预测有利储集砂体分布,并通过相应层位砂体孔隙模式图验证研究结果的准确性。

3.1 基础数据

选择5口典型代表井、15个样品点,将孔隙度(ϕ)、渗透率(k)、深度(d)、平均孔隙半径、均质系数、特征结构系数($1/D\phi$)、变异系数、碳酸盐含量、泥质含量9个地质指标作为评价因素。具体原始数据见表2,方法见文献[17-18]。

综合评价因子RQI(0~1)与储层品质呈正相关,经计算后表2中5口代表井样品点从上至下RQI依次为:0.76、0.42、0.22、0.44、0.20、0.77、0.46、0.74、0.23、0.20、0.46、0.69、0.69、0.46、0.22。

3.2 有利储集相带预测

根据RQI对全区井位进行有利储集相带预测,求得单井综合评价指数,对其分布范围进行分析,将有利

区储集相带划分为I类有利储集相带、II类有利储集相带、III类不利储集相带(表3)。有利储集相带预测图(图6)反映出:I类有利储集相带主要分布在交38、交51、交34、交47井一带,主要属于牵引流成因水下分流河道砂,大多岩相为平行层理细砂岩;II类有利储集相带主要分布在研究区中部区域,主要属于碎屑流成因水下分流河道砂,大多岩相为块状细(粉)砂岩和碎屑流水道砂;III类不利储集相带主要分布在南部区域,近岸堆积及前缘根部泥石流、洪流成因砂体形成的储层较差^[19-21]。该区储层无论是平面和横向上差异均较大,钻井所钻遇的砂体均属中—低孔隙度,多为低—特低渗型储层,但次生孔隙较发育。在2100~2300m可能存在次生孔隙发育带,使储层物性能够得到较大程度改善,是本区较好的优质储层层段。

3.3 讨论

对代表井选取相应层段孔隙特征进行研究,验证上述方法评价结果的准确性。研究区主要分为牵引流成因水下分流河道砂、碎屑流成因水下分流河道砂、内前缘混合流体成因砂砾岩、滨浅湖细粒沉积^[20-21](图7),根据不同成因对形成的砂体分布进行逐一分析如下。

(1)牵引流成因水下分流河道砂:胶结明显,孔隙

表 2 交力格地区原始数据表
Table 2 Primary data of Jiaolige area

井号	岩相	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	孔隙度/%	深度/m	平均孔隙半径/ μm	均质系数	特征结构系数 (1/Dφ)	变异系数	碳酸盐胶结 含量/%	泥质含量/ %
交 38	平行层理细砂岩	2.91	13.036	1 838.0	4.410	0.260	204.5	0.13	10.9	6.9
交 38	块状细(粉)砂岩	1.97	3.786	1 920.5	2.461	0.209	106.2	0.34	33.6	14.8
交 38	杂基支撑块状砾岩	0.68	1.813	2 107.0	1.551	0.154	2.2	0.53	15.9	34.06
交 47	碎屑流水道砂	1.59	5.211	2 220.0	4.039	0.201	61.0	0.24	24.6	17.65
交 47	杂基支撑块状砾岩	0.79	2.120	2 277.5	2.924	0.124	15.6	0.65	28.5	30.64
交 47	平行层理细砂岩	4.24	11.245	2 120.0	5.945	0.321	158.3	0.09	19.6	9.6
陆参 2	杂基支撑块状砾岩	1.90	4.690	2 224.8	2.620	0.198	153.6	0.32	15	24.11
陆参 2	平行层理细砂岩	4.12	12.351	2 050.0	3.551	0.298	185.5	0.18	20.4	5.20
陆参 2	杂基支撑块状砾岩	0.79	1.780	2 250.0	1.551	0.134	52.3	0.56	20.5	30.24
交 34	杂基支撑块状砾岩	0.48	2.230	2 350.0	1.863	0.103	12.5	0.57	18.6	29.63
交 34	碎屑流水道砂	2.12	5.417	2 275.0	3.243	0.203	87.3	0.25	19.6	21.45
交 34	交错层理细砂岩	3.94	11.236	2 252.2	5.425	0.258	145.5	0.17	25.8	9.36
交 49	平行层理细砂岩	3.98	9.896	2 707.0	4.285	0.293	187.7	0.21	19.8	7.24
交 49	远端席状砂	2.31	4.459	2 553.0	2.678	0.198	87.6	0.22	18.9	15.60
交 49	杂基支撑块状砾岩	0.79	1.983	2 496.7	1.558	0.115	12.4	0.46	12.3	37.20

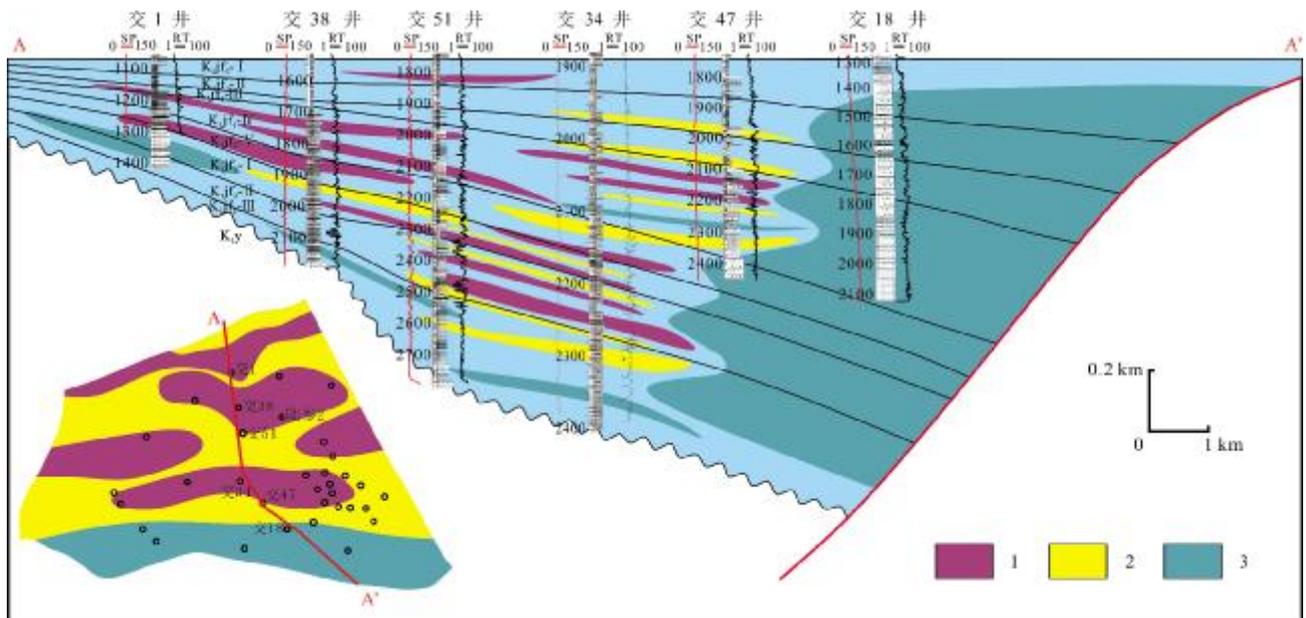


图 6 交力格地区优势储层分布图

Fig. 6 Distribution of advantage reservoirs in Jiaolige area

1— I 类有利储集相带(Class I favorable reservoir facies belt); 2— II 类有利储集相带 (Class II favorable reservoir facies belt); 3— III 类有利储集相带 (Class III favorable reservoir facies belt)

表3 交力格地区有利储层砂体定量评价标准
Table 3 Quantitative evaluation criteria of favorable reservoir sand bodies in Jiaolige area

综合评价因子(RQI)	等级划分
>0.6	I类有利储集相带
0.4~0.6	II类有利储集相带
<0.4	III类不利储集相带

发育好,粒间溶孔发育,孔隙半径集中在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,分选较好,以大中孔隙为中心形成的孔隙连通性较好;

(2)碎屑流成因水下分流河道砂:胶结明显,孔隙发育好,粒间溶孔发育,孔隙半径集中在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$,分选

较好,中小孔隙较多,条带状连通模型为主;

(3)内前缘混合流体成因砂砾岩:胶结弱,孔隙发育一般,粒间溶孔发育,孔隙半径集中在 $2\sim 7\ \mu\text{m}$,分选较差,中小孔隙居多,以管束成片连通状模型为主;

(4)滨浅湖细粒沉积:胶结较强,孔隙发育较差,孔隙半径集中在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$,分选差,小孔隙为主,斑块状连通模型为主,整体连通性较差。

孔隙特征测试结果与上述灰色关联分析法评价得到的相应层位结论有较好的吻合关系。例如交38井1838 m处储层以大中孔隙为主且连通性较好,对应上述I类有利储层砂体,证实此方法实验结果有较好的准确性。同时,较好的储层砂体主要为牵引流成

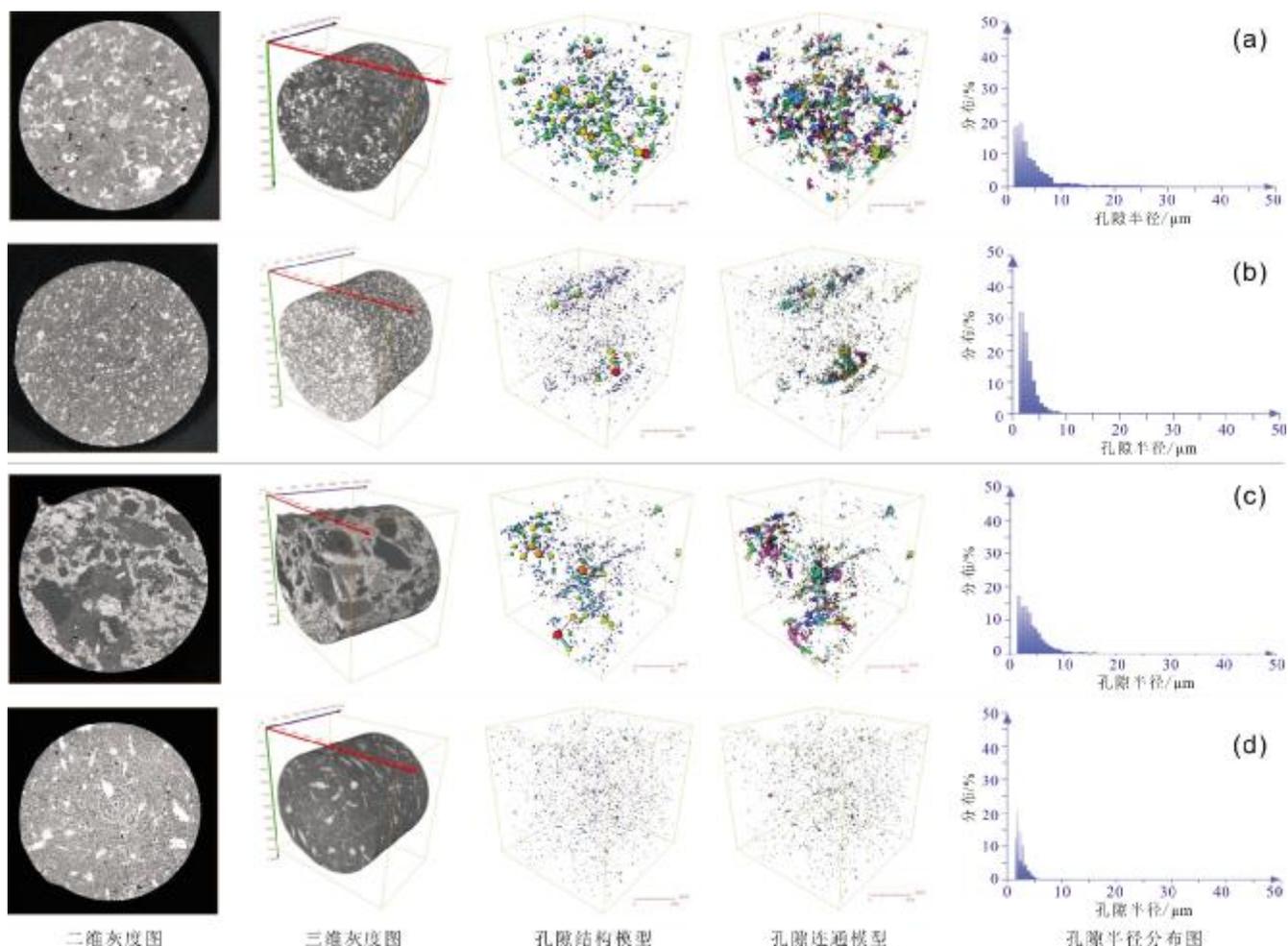


图7 交力格地区孔隙特征结构图

Fig. 7 Pore structure features of Jiaolige area

a—牵引流成因水下分流河道砂,样品为交38井1838 m (traction flow-induced subaqueous distributary channel sand, from 1838 m of J38 well); b—碎屑流成因水下分流河道砂,样品为陆参2井2056.5 m (debris flow-induced subaqueous distributary channel sand, from 2056.5 m of LC2 well); c—内前缘混合流体成因砂砾岩,样品为交47井1972 m (internal front mixed fluid-induced glutenite, from 1972 m of J47 well); d—滨浅湖细粒沉积,样品为陆参2井2224.8 m (shore-shallow lake fine-grained deposit, from 2224.8 m of LC2 well)

因的砂砾岩及砂质碎屑流成因的砂砾岩,相带上处于前缘主体牵引流河道及碎屑流朵叶体中,扇三角洲前缘内牵引流成因砂体形成储层最好,近岸堆积及前缘根部泥石流、洪流成因砂体形成储层最差.研究结果体现了不同沉积相带、不同岩相对储集砂体分布的控制作用.

4 结论

(1)交力格地区沉积过程动力成因主要由牵引流、砂质碎屑流、滑动滑塌作用、高/低密度浊流、羽流/原地沉降组成,共识别出9种砾岩岩相、15种砂岩岩相、3种泥岩岩相以及11种岩相组合.

(2)陆东凹陷交力格地区九佛堂组主要发育扇三角洲前缘亚相与近岸水下扇沉积,砂体主要为南部物源,通过沉积相特征以及单井精细刻画共识别出8种不同沉积微相.

(3)交力格地区九佛堂组时期主要发育两大沉积体系:九下Ⅲ砂组近岸堆积—半深湖体系,九下Ⅱ砂组至九上Ⅳ砂组时期发育扇三角洲—滨浅湖沉积体系,九上Ⅲ—Ⅰ砂组发育近岸堆积—深湖沉积体系,扇三角洲沉积体系时期交力格地区主要发育前缘相带.

(4)利用灰色关联分析法对沉积—储层耦合关系研究,将有利区储集相带划分为Ⅰ类有利储集相带、Ⅱ类有利储集相带、Ⅲ类不利储集相带,并证实了此方法在储层评价研究中的有效性.

参考文献(References):

[1]李瑛. 陆东凹陷交力格地区成藏规律综合研究[D]. 荆州: 长江大学, 2017.
Li Y. Comprehensive study of accumulation regularity in Ludong sag of Jiaolige area[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017.

[2]苍正毅. 开鲁盆地陆东凹陷交力格地区九佛堂组精细构造解释及沉积相研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
Cang Z Y. The Research of fine structure interpretation and sedimentary facies of Jiufotang Formation in Jiaolige area in Ludong sag, Kailu basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.

[3]刘明洁, 谢庆宾, 谭欣雨, 等. 内蒙古开鲁盆地陆东凹陷九佛堂组层序地层格架与岩性圈闭[J]. 沉积与特提斯地质, 2014, 34(3): 31-37.
Liu M J, Xie Q B, Tan X Y, et al. Sequence stratigraphic framework and lithologic traps in the Jiufotang Formation, Ludong depression, Kailu basin, Inner Mongolia[J]. Sedimentary Geology and Tethyan

Geology, 2014, 34(3): 31-37.

[4]裴家学. 陆东凹陷九上段沉积体系及储层研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
Pei J X. The study of Jf₁ sedimentary system and reservoir in Ludong depression[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.

[5]刘明洁, 谢庆宾, 刘震, 等. 内蒙古开鲁盆地陆东凹陷下白垩统九佛堂组—沙海组层序地层格架及沉积相预测[J]. 古地理学报, 2012, 14(6): 733-746.
Liu M J, Xie Q B, Liu Z, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies prediction of the Jiufotang and Shaihai formations of Lower Cretaceous in Ludong Sag, Kailu Basin, Inner Mongolia[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 733-746.

[6]潘尚文. 陆东凹陷前后河地区油藏特征及分布规律研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(6): 171-175.
Pan S W. Study on reservoir characteristics and distribution law in Qianqianhe area of Ludong sag[J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2008, 30(6): 171-175. (in Chinese)

[7]吴炳伟, 郭彦民, 王新, 等. 辽宁阜新盆地油气勘探方向[J]. 地质与资源, 2015, 24(5): 473-477.
Wu B W, Guo Y M, Wang X, et al. The oil-gas exploration direction of Fuxin Basin[J]. Geology and Resources, 2015, 24(5): 473-477.

[8]赵洪伟, 张德军. 阜新改造型盆地油气评价及勘探方向[J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 306-316.
Zhao H W, Zhang D J. Hydrocarbon evaluation and exploration direction of Fuxin reformed basin[J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 306-316.

[9]汪孝敬, 李维锋, 董宏, 等. 砂砾岩岩相成因分类及扇三角洲沉积特征——以准噶尔盆地西北缘克拉玛依油田五八区上乌尔禾组为例[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(5): 537-543.
Wang X J, Li W F, Dong H, et al. Genetic classification of sandy conglomerate facies and sedimentary characteristics of fan delta: A case study from Upper Wuerhe Formation in District Wuba in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(5): 537-543.

[10]邢恩浩, 田景春, 林小兵, 等. 东营凹陷胜坨地区沙四上亚段浊积扇致密砂砾岩储层孔隙演化[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(4): 29-39, 77.
Xing E H, Tian J C, Lin X B, et al. Porosity evolution of turbidite fan tight glutenite reservoir in Es₄ of Shengtuo area, Dongying depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(4): 29-39, 77.

[11]韩冰, 李勇, 吕建荣. 黄骅拗陷孔南地区孔二段沉积体系[J]. 特种油气藏, 2011, 18(5): 67-70.
Han B, Li Y, Lv J R. Sedimentary system in the 2nd Member of the Kongdian Formation in the Kongnan area, Huanghua depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(5): 67-70.

[12]徐增连, 李建国, 朱强, 等. 开鲁盆地钱家店凹陷早白垩世义县组袍

- 粉组合及其古气候演变[J]. 中国地质, 2021, 48(6): 1924-1934.
- Xu Z L, Li J G, Zhu Q, et al. Early Cretaceous spore and pollen assemblage from the Yixian Formation in the Qianjiadian Depression of Kailu Basin and its paleoclimate evolution[J]. *Geology in China*, 2021, 48(6): 1924-1934.
- [13] 贾国振, 刘盛益, 吴广. 长岭断陷登娄库组地震相展布及纵向演化[J]. 内江科技, 2010, 31(3): 95, 85.
- Jia G Z, Liu S Y, Wu G. Seismic facies distribution and vertical evolution of Denglouku Formation in Changling fault depression[J]. *Neijiang Science and Technology*, 2010, 31(3): 95, 85. (in Chinese)
- [14] 罗居德, 刘云华, 夏昭德, 等. 新疆昌吉南部侏罗系头屯河组物源与沉积环境分析[J]. 地质与资源, 2022, 31(4): 473-485.
- Luo J D, Liu Y H, Xia Z D, et al. Source and sedimentary environment of Jurassic Toutunhe Formation in southern Changji, Xinjiang[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(4): 473-485.
- [15] 张志垚, 张昌民, 侯国伟, 等. 东海盆地某凹陷 P 井区平湖组沉积微相及沉积模式[J]. 地质与资源, 2020, 29(2): 142-151, 160.
- Zhang Z Y, Zhang C M, Hou G W, et al. Microfacies distribution and sedimentary model of Pinghu Formation in P well area, East China Sea Basin[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(2): 142-151, 160.
- [16] 刘建平, 鲜本忠, 张莉, 等. 渤海湾盆地东营凹陷碎屑流主控型深水体系沉积过程及模式[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1951-1969.
- Liu J P, Xian B Z, Zhang L, et al. Depositional process and model of debrite dominated deep-water system in the Dongying depression, Bohai Bay Basin[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1951-1969.
- [17] 涂乙, 谢传礼, 刘超, 等. 灰色关联分析法在青东凹陷储层评价中的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 381-386.
- Tu Y, Xie C L, Liu C, et al. Application of grey correlation analysis method in reservoir evaluation of Qingdong Sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2): 381-386.
- [18] 胡求红, 张昌民, 侯国伟, 等. 马尔科夫链分析在东海陆架盆地花港组沉积微相分析中的应用[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 7-20.
- Hu Q H, Zhang C M, Hou G W, et al. Application of Markov chain analysis in the microfacies recognition of Huagang Formation in the East China Sea shelf basin[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(1): 7-20.
- [19] 宋兵, 王波, 刘兴周, 等. 辽河西部凹陷曙北地区沙四段薄砂层成因类型及分布规律[J]. 地质与资源, 2021, 30(6): 698-706.
- Song B, Wang B, Liu X Z, et al. Genetic types and distribution rules of thin sand layers in the Fourth Member of Shahejie Formation in Shubei area of the western sag, Liaohe Depression[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(6): 698-706.
- [20] 袁勇. 东胜气田锦 58 井区盒 1 沉积相描述及储层分类评价[J]. 中国石油石化, 2017(9): 32-33.
- Yuan Y. Description of H1 sedimentary facies and classification evaluation of reservoir in J58 well block of Dongsheng gas field[J]. *China Petrochem*, 2017(9): 32-33. (in Chinese)
- [21] 张代燕, 孔垂显, 孟祥超, 等. 玛北斜坡区百口泉组扇三角洲储层特征[J]. 新疆地质, 2016, 34(2): 250-256.
- Zhang D Y, Kong C X, Meng X C, et al. The differences of reservoir quality and lithofacies of fan delta in Baikouquan Formation, the Mabei slope area of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2016, 34(2): 250-256.